顶中区 N200 是中文单字字形识别的神经标识

胡伟[1] 张豹[2] 贾小飞[3] 陈辉贤[4] 袁杰[5] 方卓[6] 张学新[7*]

1 教育部人文社会科学重点研究基地天津师范大学心理与行为研究院; 天津师范大学心理学部, 中国天津 300387; 2 广州大学心理系, 中国广州 510006; 3 曲阜师范大学心理学系, 中国曲阜 273165; 4 汕头大学高等教育研究所, 中国汕头 515041; 5 华南师范大学心理学院, 中国广州 510631; 6 渥太华大学心理学系, 加拿大渥太华 K1N6N5; 7 复旦大学心理系, 中国上海 200433

摘 要 中文视觉词汇加工近年来的一个重要发现是，中文双字词识别诱发了一个反映词形加工的顶中区 N200 脑电成分，该成分呈现了较为少见的重复增强效应。双字词的词形加工是一个复杂过程，不仅包含对两个单字字形信息的加工，还有两个单字间的相对位置关系信息。要进一步理解 N200 对应的字形加工过程，需要回应一个关键问题，N200 是否与单字的字形加工有关。本文以三个实验系统研究了在双字词 N200 这一时间段内单字诱发的脑电反应，发现与双字词一样，单字在刺激呈现后 200 ms 也诱发了清晰的顶中区 N200 反应，且该效应在重复启动时出现增强效应。N200 的幅度在双字条件下高于单字，在真字条件下高于假字、非字，说明该成分反映了从部件到单字，从单字到双字的整合加工，是中文单字字形识别的神经标识，为揭示中文词汇识别的时间进程提供了一个关键线索。

关键词 顶中区 N200，中文，单字，字形加工，词汇识别

收稿日期：2024-09-26

教育部“春晖计划”项目(HZKY20220601)资助。

* 通讯作者：张学新。邮箱: xuexinzhang@fudan.edu.cn.

1 引言

前期研究发现，中文双字词识别会诱发一个称为顶中区 N200 的脑电成分(Zhang et al., 2012; Du et al., 2014)。该成分是一个负波，主要分布在中央、顶部以及额部脑区，一般出现在词汇刺激呈现后 200 ms 左右。顶中区 N200 的一个突出特征是在重复启动范式中出现负向增强效应，即相对于非重复条件，重复启动条件下的中文双字词会诱发出波幅更大的 N200。该重复效应以中央和顶部脑区为中心, 分布范围较广。张学新 等人(2012)认为，N200 在拼音文字的词汇识别任务中并未出现，说明该成分反映了中文词汇识别特有的词形加工过程，提示相对于拼音文字，中文词汇识别涉及更为复杂的视觉加工。近 10 年来，顶中区 N200 被多个研究重复(Yin & Zhang, 2021; Zhou et al., 2016; Du et al., 2013; 许贵芳, 2008; Zhang et al., 2006; 张钦 等, 2003)，其可靠性和稳定性得到广泛认可，并被视为中文字形加工的一个重要进展(Gao 等, 2022; Chen 等, 2017; Hu 等, 2013)。

然而，双字词研究虽为揭示中文词汇加工的神经机制提供了重要线索，但双字或多字词可分解为单字，而单字作为中文词汇加工的基本单位，具有更为核心的地位。双字词的识别，不仅包含对两个单字的识别，还包含对两者相对位置的加工(Gu et al., 2015)。 比如，汉字转置效应表明，调整两个单字的相对位置影响词汇加工的进程(Yang et al., 2022; 滑慧敏, 顾俊娟, 林楠, 李兴珊, 2017)。在双字词稳定诱发顶中区 N200 得到确认之后，探讨单字词是否诱发 N200，能够为认识 N200 的本质、揭示中文词汇加工过程提供重要线索。本研究的研究假设为：如果单字词不能诱发 N200，说明 N200 主要编码单字层次之上的词形信息，如单字间的位置关系，那么 N200 与更为基本的单字字形加工关联不大，其作用可能较为有限。如果单字词能够诱发 N200，则说明该成分反映对单字的字形信息加工。

对单字顶中区 N200 的研究目前数量有限，结果也不太一致。Xie 等人(2020)使用重复启动范式，要求被试分别在字体内部(繁体到繁体)或字体间(繁体到简体)切换条件下判断两个中文单字词是否相同，都发现了顶中区 N200，也有重复增强效应。Yin 等人(2020)使用书写动图配对判断任务，先呈现中文单字的书写动图，再呈现单字，要求被试判断两个字是否相同，也记录到了 N200 反应。然而，Zhang 等人(2009)要求被试对成对出现的简体单字做同音或语义相似性判断，虽然观察到清晰的 P200、N400，但并没有观察到 N200。Hsu 等人(2009)要求被试对繁体单字进行默读命名，观察到 N170、P200、N400，但未观察到 N200。

顶中区 N200 在单字阅读任务中的不稳定性，可能与实验范式有关。Xie 等人和 Yin 等人的研究涉及字形判断，如词汇判断和字形匹配，成功诱发了 N200，而不直接聚焦字形加

工的任务，如 Zhang 等人、Hsu 等人的同音/同义判断或默读命名，则未观察到 N200。顶中区 N200 的产生可能取决于任务对字形加工的需求程度。也有可能，单字的顶中区 N200 幅度较弱，需要设计更为聚焦字形加工的任务。例如，避免采用涉及深度语义任务或相邻刺激比较的实验设计，以降低语义信息干扰或相邻刺激影响，提高实验敏感度。综合以上考虑，本研究设计了系列实验探讨单字能否诱发顶中区 N200 以及该成分对应的认知过程。

2 实验 1：单、双字词语义判断任务下的顶中区 N200

2.1 研究设计

本实验采用语义判断任务，比较单、双字词在呈现后 200 毫秒左右时间窗口诱发的脑电波。预期双字词会诱发清晰的 N200，着重探讨在相同的实验任务下单字是否也能诱发 N200。实验引入双字词作为控制条件，提高对实验结果的解释力。如果双字词没有诱发 N200，说明实验控制并不理想。如果双字词能重复文献中的典型结果，诱发清晰的 N200，但单字没有诱发 N200，说明该阴性结果比较可靠。

如果单字也能诱发 N200，单、双字处于同样的实验条件下，也可以分析比较两者 N200 的异同。文献中在同一个实验中对汉语单字词、双字词加工进行跨刺激类型比较的并不多见(但见 Maurer et al., 2024)。为控制刺激的物理属性，单字词均由双字词拆分而来。实验包括两个子实验，在 1A 中两类刺激混合在同一组块内(混合条件)，在 1B 中两类刺激分开呈现。相较 1B，在 1A 中被试需要应对单字和双字的切换，认知负荷更重，可能涉及更多策略性加工。通过比较两个子实验，也可以分析策略性加工对 N200 的影响。

2.2 研究方法

被试

采用 Gpower3.1 软件，参考前人(张学新 等, 2012)关于中文双字词在重复启动和对照条件下，在 N200 时间窗口内的波幅差异的效应量大小($f = 0.60$, $n = 20$, 实验 3：重复启动对 N200 的影响)，并根据 Cohen(1988)对效应量大中小的界定，设置效应量 $f = 0.8$，当样本量达到 20 时，统计检验力在$\alpha = 0.05$ 时可以达到 0.92。40 名(17 女)健康大学生自愿参加了本实验。随机分配其中一半参与实验 1A，另一半参与实验 1B。所有被试均为右利手，年龄在 20 ~ 27 岁之间(平均 23.2 岁)，母语均为汉语，视力或矫正视力正常。被试实验前均阅读并签署经研究伦理委员会批准的知情同意书。

流程

被试坐在带电磁屏蔽的隔音室内的沙发上，面对计算机屏幕，视距约 70 厘米，右手食指放在电脑键盘 J 键上。要求双眼注视屏幕中央的注视点，在刺激呈现和做按键反应期间，避免眨眼，尽量减少头部运动。每次测试先呈现 600 ms 的注视点，然后呈现一个单字(视角 2.3°×2.3°)或双字刺激(视角 4.6°×2.3°)，400 ms 后刺激消失，随后随机等待 1400 到 1600 ms 后开始下一次测试。被试执行基于语义的目标检测任务，即判断呈现刺激是否为动植物名称。如果是，则迅速按键反应，否则无需反应。实验流程见图 1。

材料

实验使用 240 个双字词作为关键的测试材料，平均词频分别为 30.9(根据《现代汉语词频词典》(1986)计算，单位为每百万次的出现次数)，两字笔画数总和的平均值分别为 18.7。

实验 1A 为单、双字混合条件，包含 6 个组块，每个组块 78 个试次，包含 60 个关键试次(40 个双字词，20 个单字词)和 18 个填充试次(12 个双字词，6 个单字词)。填充试次一半为动物名称，一半为植物名称。关键试次的单字词均由双字词拆解而来，实现单、双字刺激物理属性的匹配。双字词试次较多是由于最初设计中区分了语义透明与不透明两个条件，但结果发现透明度没有影响，所以将两组合并。

实验 1B 为单、双字分组条件，包含 6 个组块，其中 4 个组块为双字组块，各包含 78 个试次(60 次测试，18 次填充，均为双字词)，另外 2 个组块为单字组块，各包含 78 个试次(60 次测试，18 次填充，均为单字词)。一半被试先完成双字组块，再完成单字组块，另一半被试次序相反。

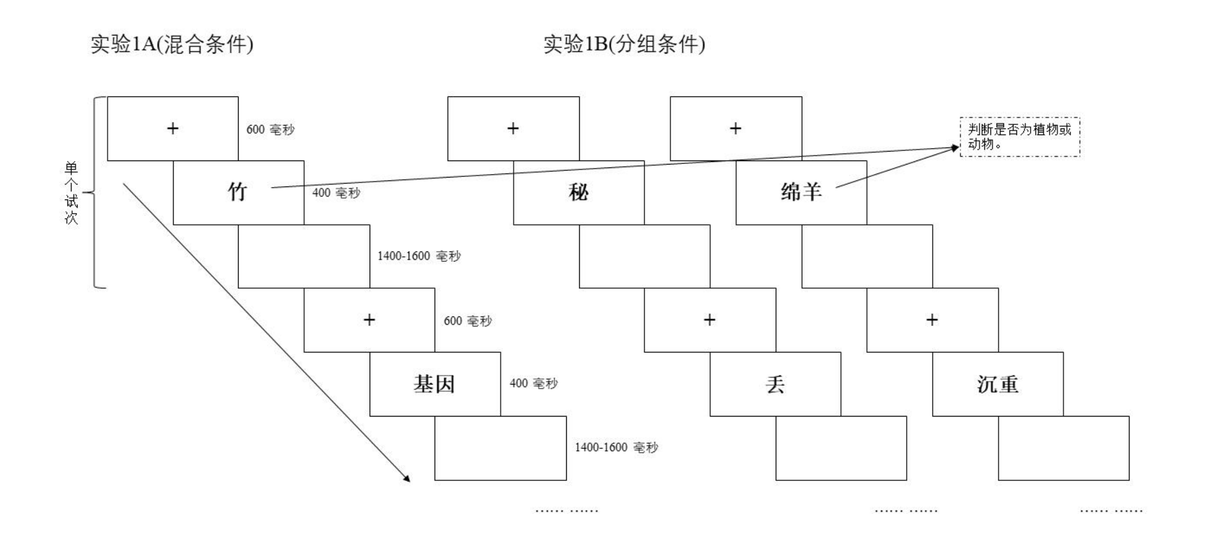


图 1 实验 1 流程和条件示意图

脑电记录

脑电记录采用 Neuroscan 公司 64 导脑电设备和 Ag/AgCl 电极帽。电极分布采用扩展的 10-20 构形，带通滤波范围为 0.1 ~ 70 Hz，采样频率为 500 Hz。接触电阻小于 5 千欧。记录竖直眼电的电极位于左眼下方和左眉骨上方。记录水平眼动电极位于两眼外侧。以左侧乳突为参考电极，离线使用双侧乳突信号平均值做再参考。取样从刺激出现前 100 ms 开始，时长 1000 ms。分析采用 Scan4.3 软件(http://www.neuroscan.com)。以-100 至 0 ms 的电压均值为准，做基线校正。离线滤波选用带通滤波(0.1 ~ 30 Hz)。眼动校正中参数设置为，最小 sweep 数 ＝20，眨眼时间长度 ＝400，阈限 ＝10%。叠加平均中排除错误反应和振幅大于±100 μV 的反应。对各实验条件，剔除试次占总试次的比例在 12%到 18%，对于 1A 的单字词、双字词条件，有效试次分别为 103、197 次。对于 1B 的单字词、双字词条件，有效试次分别为 106、204 次。

2.3 结果和讨论

实验 1 有 1 个被试的行为数据因技术故障丢失，经问询确认其完成任务情况良好，仍然使用其脑电数据。1A 中，对单字目标检测的正确率高于对双字目标的检测(97.4% vs. 94.9%, $t(18) = 1.73$, $p = 0.02$, Cohen’ $d = 0.71$, 95% CI = [0.07, 1.35])，反应时没有差别(594 vs. 587 ms, $p = 0.38$)。1B 中，对单字目标检测的正确率和反应时与双字目标的差异均不显著(93.1% vs. 93.1%, 553 vs. 552 ms)。

脑电结果显现了 N1，P2 和 N400 三个词汇识别过程的典型成分。由于 N200 在 CPZ 电极上较为清晰(张学新 等, 2012)，图 2 给出了 CPZ 和其相邻的 CZ、PZ 三个代表性电极上的平均脑电反应。 与文献一致(张学新 等, 2012)，均值计算选用了 FC1、FCz、FC2、C1、Cz、C2、CP1、CPz、CP2、P1、Pz、P2 共 12 个电极。图 2 中 4 条曲线分别对应实验 1A 中的单(1C)、双字 (2C) 混合条件和 1B 中的单(1C)、双字(2C)分组条件。混合呈现时(实验 1A)，双字(粗实线)诱发了 N200 但单字没有(细实线)。分析表明，双字在 N200 峰值附近 80 ms 时间窗口内(150-230 ms)的波幅均值显著高于(更负)单字(4.41 vs. 4.90 μV, $t(19) = 2.40$, $p = 0.02$, Cohen’ $d = 0.16$, 95% CI = [-0.46, 0.79])。分组呈现时(实验 1B)，双字(粗点线)诱发了 N200，单字也有微弱的 N200(细点线)。双字在 N200 窗口内的波幅均值显著高于(更负)单字(3.62 vs. 4.50 μV, $t(19) = 3.53$, $p = 0.002$, Cohen’ $d = 0.45$, 95% CI = [-0.18, 1.07])。跨实验 1A、1B 比较，无论单字还是双字，分组条件(点线)比混合条件(实线)都倾向于诱发更为清晰的 N200，但统计不显著(单字: 4.50 vs. 4.90 μV, $p = 0.15$; 双字: 3.62 vs. 4.4 μV, $p = 0.27$)。这些结果验证了双字词诱发 N200 的结论，同时提示单字也能诱发 N200，但幅度较为微弱。任务策略可能也

对 N200 幅度有一定影响，分组呈现时 N200 更为清晰。较之混合呈现，分组呈现需要较少注意参与(孟迎芳 等, 2023)，认知资源可以更充分地用于字形加工。

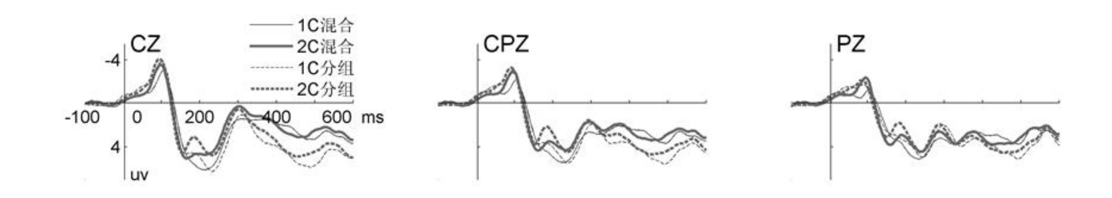


图 2 单、双字词(1C、2C)混合和分组呈现条件下的脑电波形

3 实验 2: 词汇判断任务下真、假字的 N200 重复增强效应

3.1 研究设计

实验 1 观察到单字词在语义判断任务中也能诱发顶中区 N200，但相较双字词，幅度比较微弱。为确认该结论，实验 2 观察单字词诱发的脑电在 N200 时段是否存在重复增强效应。重复启动下波幅的显著增强是双字词顶中区 N200 的突出特点(张学新 等, 2012; 吕勇 等, 2008)。如果对单字词也能够观察到类似的波幅增强，就能进一步确认单字词诱发 N200 这一结果的可靠性。重复增强是一种启动效应，涉及两个高度匹配实验条件之间的对比，是更敏感的指标。双字词 N200 研究很多都是基于其重复效应(如 Zhang et al., 2012; Du et al., 2013)。单字词诱发的 N200 幅度比较微弱，以重复增强效应为指标可能比 N200 本身更有效。

张学新 等人(2012)中的实验 3 是对双字词重复启动的首个研究，采用了区分中文与彦文的词汇判断任务。本实验也采用类似任务。已有研究已经表明顶中区 N200 不涉及语义加工(张学新 等, 2012；Du et al., 2013)，这里采用非语义的词汇判断任务，如果再次发现单字词的 N200 反应，可以强化 N200 反映字形加工的结论。要求被试区分真字和假字还可以分析假字是否诱发 N200 以及是否存在重复增强效应。假字由汉字部件构成，部件所在位置符合汉字的构造规则，但整体缺乏内部词形表征。如果 N200 仅仅反映部件加工，对真假字的 N200 反应应该是相似的。如果 N200 还反映对部件间位置关系的加工，对假字的 N200 反应应该弱于真字。

3.2 研究方法

被试

根据实验 1 中计算的被试量，新的一组 26 名(16 女)健康大学生参加了本实验，年龄在 20～27 岁之间(平均 24.2 岁)。其它情况包括刺激参数和脑电记录、分析与实验 1 相同，但

采用了 Neuroscan 公司的 32 导脑电设备。

流程

被试在注视点之后看到一个真字或假字(是否符合汉字字形结构规律)，呈现 400 ms。被试如果判断是真字，就按一个键反应，如果是假字，则按另外一个键，要求准确迅速。从刺激出现算起，被试有一个 1900 ms 的反应窗口。被试反应后 800 ms，开始下一次测试。左右按键被试间平衡。

材料

总共使用 96 个真字、 96 个假字(见附录 2)，笔画数逐字匹配，平均笔画数 9.7，真字平均字频 225，根据《现代汉语词频词典》(1986)计算，单位为每百万字的出现次数。每个被试完成 8 个组块，每个组块 72 次测试，包含 24 个重复的相邻刺激对，12 对真字重复，12 对假字重复。另有 12 个真字、12 个假字只出现一次。每个组块共计使用互不相同的 24 个真字和 24 个假字。所有真、假字在前 4 个组块中被使用一次(24×4 = 96)，在后 4 个组块中被重复使用一次，以获得更多数据。每个组块里各类刺激随机排序。每两个相邻刺激中的第一个为启动刺激，第二个为目标刺激。分析所有序列里相邻测试的刺激类型，根据启动和目标关系，定义如下条件：(1)真字对照，两者都是真字且相互无关；(2)真字重复，两者是同一个真字；(3)假字对照，都是假字且互不相同；(4)假字重复，为同一个假字。真字、假字重复条件各包含 96 次测试，真字、假字对照条件各包含约 55 次测试。见图 3。

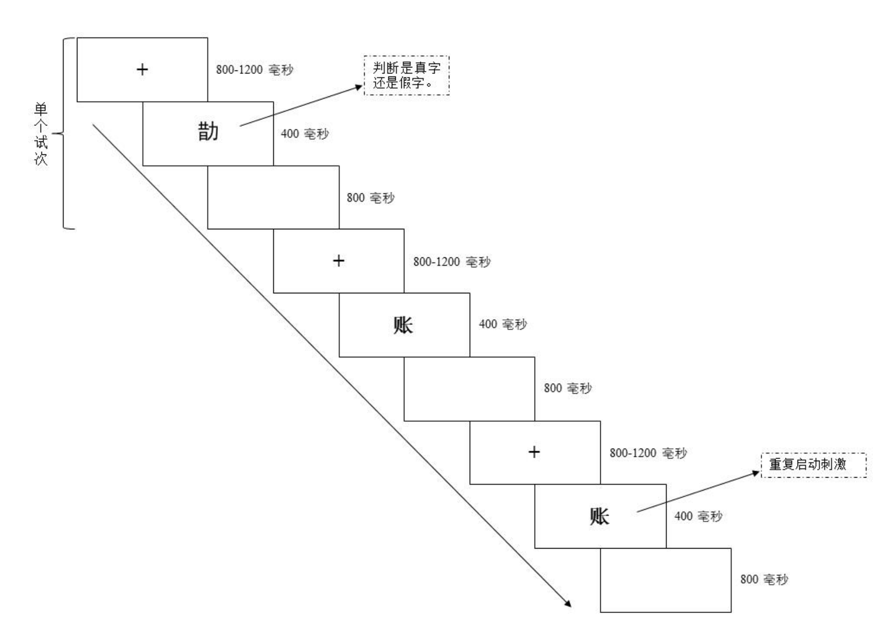


图 3 实验 2 流程和条件示意图

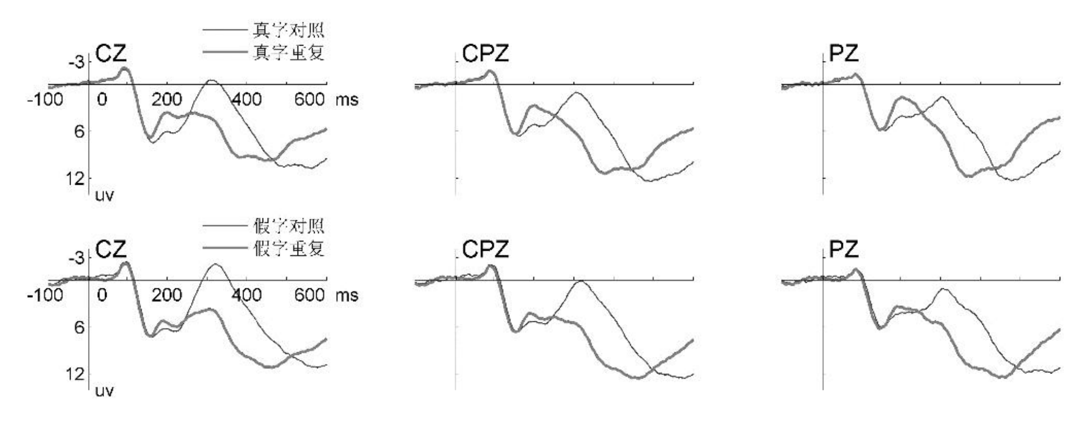
3.3 结果和讨论

两名被试伪迹过多，数据被去除，有效被试 24 个。各实验条件剔除试次占总试次比例

在 5%到 21%，真字重复和控制条件有效试次为 91、49 次，假字重复和控制条件为 83、43 次。对反应正确率的 ANOVA 分析(被试内 2×2)显示，刺激类别(真字、假字)和重复因素(对照、重复)存在交互作用($F(1, 23) = 5.46$, $p = 0.02$, $\eta^2 = 0.19$, 95% CI = [3.39, 7.53])。真字重复比对照条件错误率显著降低 4.3%(0.8% vs. 5.1%, $t(23) = -5.05$, $p < 0.001$, Cohen' $d = -1.2$, 95% CI = [-1.81, -0.58])，假字降低了 7.7%(7.2% vs. 14.9%, $t(23) = -5.26$, $p < 0.001$, Cohen' $d = -1.2$, 95% CI = [-1.81, -0.59])。

反应时分析也显示出交互作用($F(1, 23) = 25.67$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.53$, 95% CI = [18.55, 32.79])。真字重复比对照条件反应速度加快了 90 ms(459 vs. 549 ms, $t(23) = -12.7$, $p < 0.001$, Cohen' $d = 1.36$, 95% CI = [0.73, 1.99])，假字加快了 130 ms(512 vs. 642 ms, $t(23) = -13.68$, $p < 0.001$, Cohen' $d = 1.58$, 95% CI = [0.93, 2.23])。行为结果说明真、假字均出现重复启动效应，且假字效应幅度大于真字。

图 4 给出了真、假字在代表性电极上对目标刺激的平均脑电反应。真、假字在对照条件下诱发的 N200 较弱，但在重复条件下波幅增大，N200 非常明显，地形图表明重复增强效应主要分布在顶中区。类似实验 1，在 N200 峰值左右各 40 ms 时间窗口内(160～240 ms)用 ANOVA 分析 12 个电极上(FC3、FCZ、FC4、C3、CZ、C4、CP3、CPZ、CP4、P3、PZ、P4，相对实验 1，电极帽改为 32 导，电极仍为中线电极及最靠近中线的电极)上的平均波幅，显示刺激类型和重复因素存在显著交互作用($F(1, 23) = 4.74$, $p = 0.03$, $\eta^2 = 0.17$, 95% CI = [2.81, 6.67])，证实了上述观察。简单效应分析表明，N200 的增强效应对真、假字均达到显著或边缘显著水平(真字: 3.6 vs. 5.2 μV, $t(23) = 3.82$, $p < 0.001$, Cohen' $d = 0.69$, 95% CI = [0.11, 1.27]; 假字: 4.7 vs. 5.4 μV, $t(23) = 2.06$, $p = 0.05$, Cohen' $d = 0.28$, 95% CI = [-0.29, 0.85])，前者的增强幅度高于后者(1.6 vs. 0.7 μV, $p = 0.029$, Cohen' $d = 0.51$, 95% CI = [-0.07, 1.08])。N400 上观察到了典型的重复启动效应，真、假字在重复条件下均有显著的波幅降低。



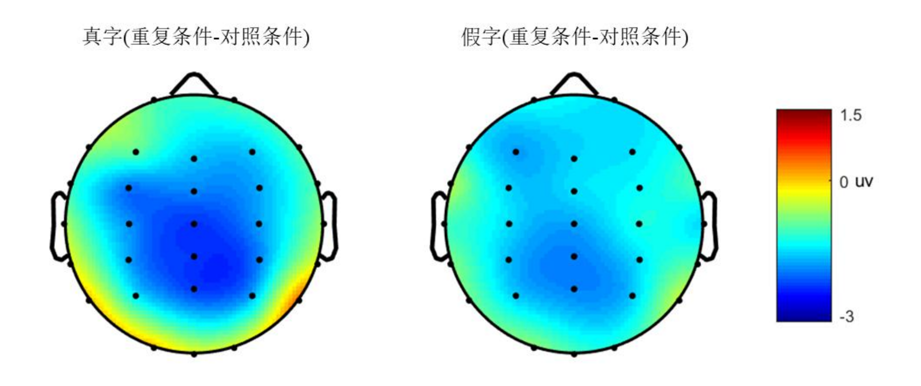


图 4 真、假字重复和对照条件下的脑电波形(上)与 N200 增强效应地形图(重复启动减去对照；下)

类似双字词，单字在重复启动下也出现清楚的 N200 波幅增强。这表明 N200 脑电活动在单字水平上也是存在的。此外真字重复导致的 N200 增强效应大于假字，说明以 N200 重复效应为指标可以判断，在单字呈现后 200 ms 左右，被试已经能够区分真字和假字。

4 实验 3：词汇判断任务下真、非字的 N200 重复增强效应

4.1 研究设计

实验 2 表明，假字的 N200 重复效应幅度小于真字。假字也由真实部件构成，但其部件间的组合跟真字不同。对假字加工也诱发 N200，说明 N200 至少在一定程度上反映了对部件的加工。另外，N200 也应该在一定程度上反映了对部件间组合关系的加工。否则，真、假字的 N200 重复增强应该是相同的。本实验使用非字刺激来验证这些推断，进一步探究 N200 对应的加工过程。

非字由真实的部件构成，但不符合汉字的构建规律。如果 N200 仅与部件的识别有关，非字重复启动时应该也出现增强效应。如果 N200 也与部件间位置关系的识别有关，非字部件间关系没有脑内表征，其 N200 增强效应应该比真字小。

在实验 2 中，一个部件在启动字和目标字里处于相同的位置。为考察部件的位置是否影响 N200，本实验增加了两个“换位”启动条件。一个真字，如“早”，由“日”、“十”组成。如果把两部件位置互换，形成一个可以称为“换位字”的刺激(见附录 3)。“换位字”通常不是真字，但与对应真字有相同部件。用真字启动其“换位字”，或反之，，如果出现 N200 增强效应，则说明对部件的加工不完全依赖其位置信息，如果不出现增强效应，则得出相反的结论。

4.2 研究方法

被试

根据实验 1 中计算的被试量，新的一组 20 名(8 女)健康大学生参加了本实验，年龄在

21～25 岁之间(平均 22.9 岁)。其它情况与实验 1 相同，但脑电记录采用 Brain Products 公司 64 导 BrainAmp 设备。参考电极采用缺省设置的 FCz，离线处理用双侧乳突信号平均做再参考，并插值计算 FCz 信号。

材料

测试刺激包括 600 个双部件真字(平均字频 123，平均笔画数 9.9，上下结构 114 个，左右结构 486 个)和每个单字对应的‘换位字’(上下结构的字，两部件上下换位，左右结构的字，两部件左右换位)。所有真字其‘换位字’均为非字。类似实验 2，注视点后呈现一个真字或非字，400 ms 后消失。被试判断是否为真字并按键反应。每个被试完 10 个组块，每个组块使用 60 个不同的真字(和其对应的换位字)构建 80 次测试，或 40 对启动-目标刺激对，均分到 8 种条件。根据启动和目标的关系，定义 4 种条件，真字对照、真字重复、非字对照和非字重复。另外定义 4 种换位启动条件：(1)真-换对照，启动是真字，目标是另一个真字的换位字；(2)真-换重复，启动是真字，目标是其换位字；(3)换-真对照，启动是一个真字的换位字，目标是一个不同的真字；(4)换-真重复，启动是换位字，目标是其对应的真字。每个条件包含 50 次对目标刺激的反应。各实验条件剔除试次占总试次比例在 8%到 12%。实验流程见图 5。

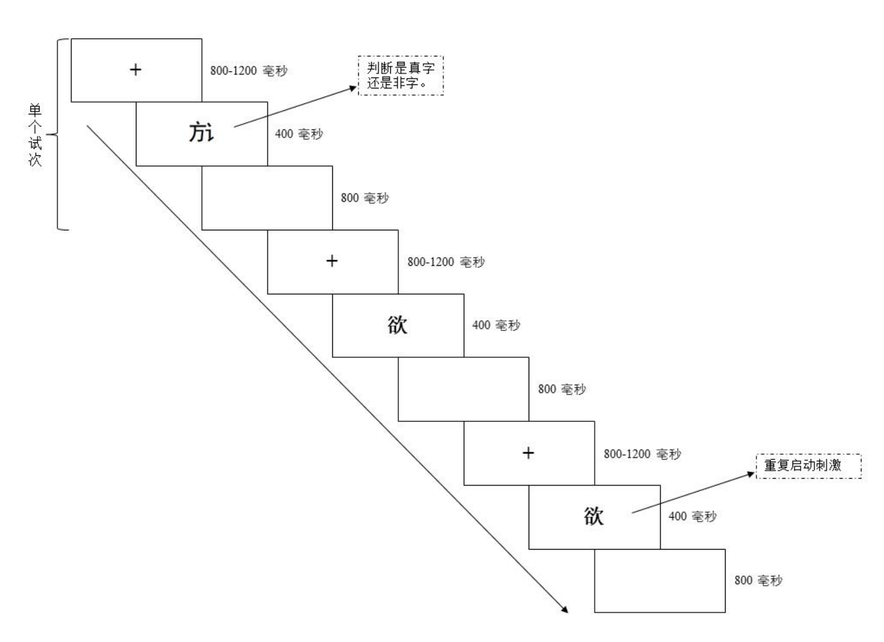


图 5 实验 3 流程和条件示意图

4.3 结果和讨论

对目标反应正确率的 ANOVA 分析(被试内 4×2)显示,启动类型(真字、非字、真-换、换-真)和重复因素(对照、重复)存在交互作用($F(3,57) = 6.12$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.24$, 95% CI = [4.64,

7.60])。相比对照条件，真字重复错误率降低 2.6%(1.7% vs. 4.3%, $t(19) = -2.45$, $p = 0.024$, Cohen' $d = -0.61$, 95% CI = [-1.24, 0.02]),非字重复下降 2.9%(4.9% vs. 7.8%, $t(19) = -1.85$, $p = 0.07$, Cohen' $d = -0.55$, 95% CI = [-1.18, 0.08])。真-换重复升高 2.1%(5.7% vs. 3.6%, $t(19) = 2.1$, $p = 0.04$, Cohen' $d = 0.51$, 95% CI = [-0.12, 1.14])，换-真重复升高 3.2%(6.3% vs. 3.1%, $t(19) = 3.11$, $p < 0.006$, Cohen' $d = 0.55$, 95% CI = [-0.08, 1.18])。

反应时分析也显示显著交互作用($F(3,57) = 27.42$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.59$, 95% CI = [22.49, 32.35])。相比对照条件，真字重复的反应速度加快 46 ms(496 vs. 544 ms, $t(19) = -7.62$, $p < 0.001$, Cohen' $d = -0.64$, 95% CI = [-1.28, 0]），非字重复加快 31 ms(565 vs. 595 ms, $t(19) = -4.3$, $p < 0.001$, Cohen' $d = -0.36$, 95% CI = [-0.99, 0.26])。真-换重复减慢 21 ms(585 vs. 564 ms, $t(19) = 3.72$, $p = 0.002$, Cohen' $d = 0.27$, 95% CI = [-0.35, 0.89])，换-真重复减慢 12 ms(541 vs. 529 ms, $t(19) = 2.67$, $p = 0.01$, Cohen' $d = 0.17$, 95% CI = [-0.45, 0.79])。行为结果说明，真、非字均出现重复启动。两种换位重复条件的负启动效应可能来源于反应竞争。比如,被试刚对一个真字做出'是真字'判断,在下一次测试里随即要对由同样部件组成的换位字做出'不是真字'的相反判断，可能受到干扰。

图 6 给出了重复启动和对照条件在代表性电极上对目标刺激的平均脑电反应。四种刺激在对照条件下均诱发 N200，在启动条件下均出现 N200 波幅增强，但真字重复的增强幅度高于其它条件。类似实验 1，对 N200 时间窗口内(160-240 ms)12 个电极上的平均波幅进行被试内 4x2ANOVA 分析，证实了上述观察：启动主效应显著($F(1,19) = 22.58$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.54$, 95% CI = [18.48, 26.68])，刺激类型和启动存在交互作用($F(3,57) = 2.71$, $p = 0.05$, $\eta^2 = 0.13$, 95% CI = [1.59, 3.83])。真字条件下的增强效应为 1.8 μV(3.26 vs. 5.04 μV, $t(19) = -4.46$, $p < 0.001$, Cohen' $d = -0.56$, 95% CI = [-1.18, 0.05])，高于其他条件(非字: 0.9 μV, 4.3 vs. 5.2 μV, $t(19) = -3.14$, $p = 0.005$, Cohen' $d = -0.24$, 95% CI = [-0.85, 0.37]; 真-换: 0.6 μV, 4.8 vs. 5.4 μV, $t(19) = -1.82$, $p = 0.08$, Cohen' $d = -0.16$, 95% CI = [-0.76, 0.45]; 换-真: 0.7 μV, 3.8 vs. 4.5 μV, $t(19) = -1.96$, $p = 0.06$, Cohen' $d = -0.22$, 95% CI = [-0.83, 0.39])。

把真字重复和真字对照两个条件去除，对剩余 6 个条件进行 3×2 ANOVA 分析，仍有显著的主效应($F(1,19) = 9.35$, $p = 0.007$, $\eta^2 = 0.33$, 95% CI = [6.23, 12.48])，但不存在交互作用($F < 1$)，说明增强效应对非字、换-真、真-换没有区别。对增强效应的地形图分析也与这些结果相符(见图 6)。

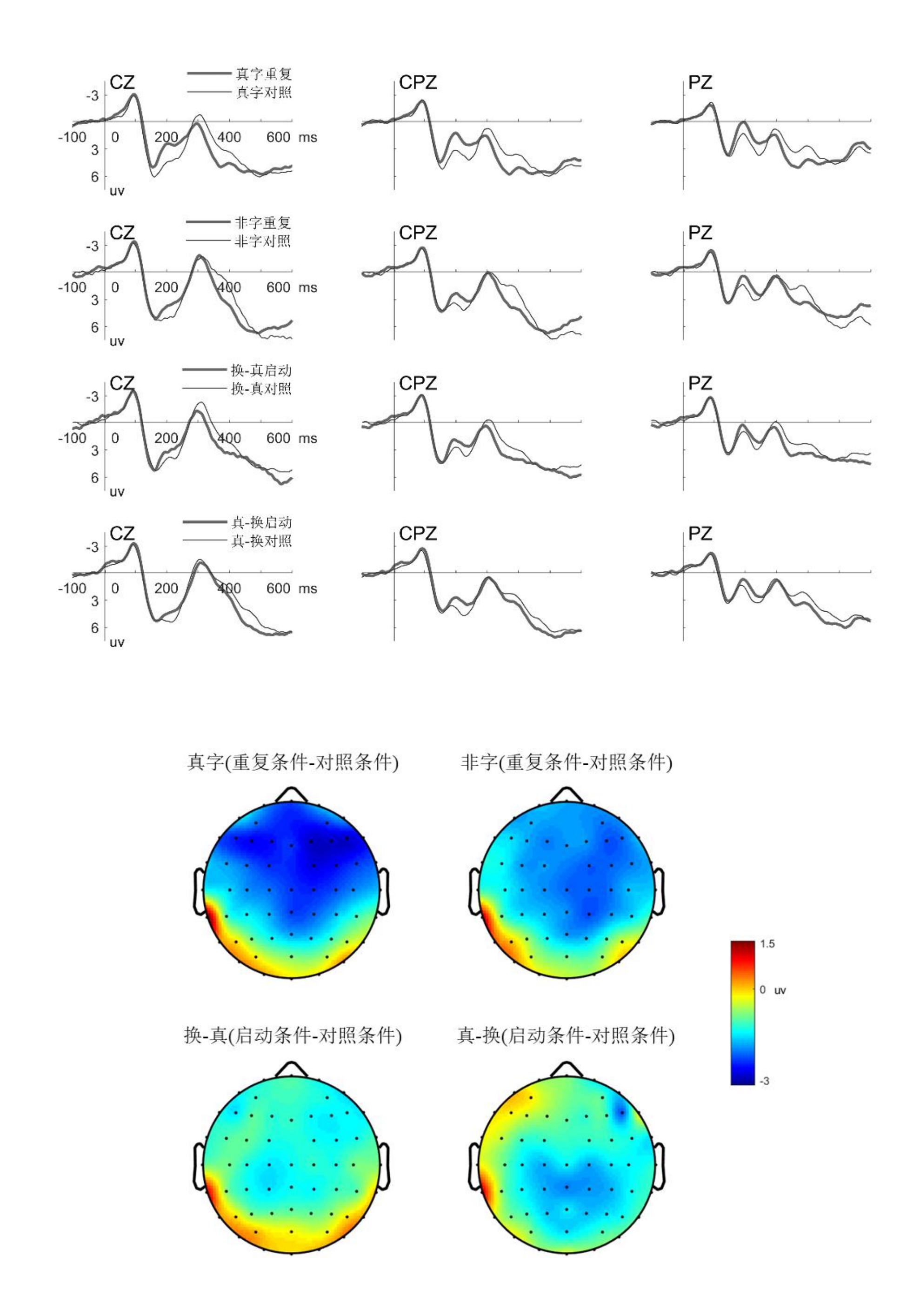


图 6 四种刺激类型在重复和对照条件下的脑电波形(上)与 N200 增强效应地形图(重复启动减去对照；下)

本实验在重复启动情况下再次观察到真字的 N200 增强，验证了实验 2 的结论。重要的是，发现非字也引发 N200，重复呈现也导致 N200 增强，但幅度显著小于真字。这些结果与实验 2 中的假字类似，说明 N200 反映部件加工，也反映部件组合关系加工，以 N200 重复效应为指标，能够区分真字和非字加工。另外，真字同其部件互换位置后形成的非字之间互相启动，出现增强效应(即 AB 组合启动 BA 组合，A、B 均为部件)，提示部件加工在一定程度上不依赖于其所在位置。

5 总讨论

实验 1 采用语义检测任务，发现在相同实验条件下，双字诱发顶中区 N200 反应，单字也诱发较弱的 N200 反应。这就首次通过较为严密的单、双字刺激对照实验，表明 N200 反应不局限于双字词，对单字也存在。实验 2 和 3 采用词汇判断任务，都发现了单字的 N200 重复增强效应。由于该效应是顶中区 N200 的一个标志性属性，因而这些跨实验、跨范式情况下高度一致的结果，提供了单字诱发 N200 的可靠证据。

实验 2、3 还发现，N200 重复效应对假字和非字也都存在，但幅度比真字小。真字部件间的位置关系在脑内有先在(pre-existing)表征，而假字、非字没有。真字的增强效应比假字、非字更大，说明该效应不仅反映部件加工，还反映对部件位置关系先在表征的通达。如果 N200 重复效应既反映部件加工，也反映部件间位置关系加工，那么 N200 应该是单字字形识别的一个神经指标。实验 2、3 结果表明，在单字呈现后 200 ms 左右，这个指标已经能够分辨部件的特定位置关系组合是否有先在表征，即在字形上把真字同假字、非字进行了区分。这说明中文字形识别在单字呈现后 200 ms 左右已经完成。

被试对真字的部件和部件位置关系更熟悉，这可能导致更强的 N200 反应，假字和非字缺乏语义和感知经验，导致 N200 波幅较低。如果 N200 受被试先前经验的影响，未来研究要更多关注熟悉性。未来研究也可以考虑独体字。独体字本身是一个部件，不包含部件间位置关系，独体字是否诱发 N200 效应，能够避开真、假、非字的熟悉性差异，更直接阐明 N200 与部件加工的联系。

中文单字识别的脑电研究通常还关注 N170 和 N400(Cao et. al., 2011; Tsai et. al., 2009; Meng et. al., 2008)。N170 主要定位于颞枕区，对面孔、字词、面孔等多种类别的刺激都会出现。但 N170 不显示重复启动效应，表明其无法区分类内不同的个体成员(Schweinberger et al., 2004)。同时，N170 对于拼音文字刺激表现出左侧单侧化的特点(Maurer et al., 2005; Rossion et al., 2003)，在目前的 N200 结果中并未观察到单侧化。N400 分布很广泛，重复启动下出现波幅降低，对语义和语音加工敏感(Kutas & Federmeier, 2011)，反映字形识别之后的加工。N200 有可能反映了 N170 和 N400 中间的加工过程。尽管大量研究表明 N170 反映视觉词形的抽象加工过程(如 Simon et al., 2007; Maurer & McCandliss, 2008; Maurer et al., 2024)，但也有研究表明(Rossion & Jacques, 2008)，N170 成分反映了对视觉刺激的初步处理，尤其是对整体抽象构型的加工。这意味着，无论对字母文字还是汉字，N170 都可能实现对字形局部结构特征的识别，如字母轮廓、笔画组合等，但尚未达到对整词或整字的识别，因

而对字母文字(Schweinberger et al., 2004)或汉字(见附录 4)均未出现重复启动效应。

字母词汇的词形空间构型相对简单，而且与语音表征密切相关，可能借助语音通道得到进一步加工。汉字词形涉及到局部结构特征的整合，需要更精细、复杂的加工过程。在枕颞区抽取笔画和笔画组合之后，应该还需要一个过程去完成字形整合，顶中区 N200 可能反映了这一中文特有的字形加工过程，也构成了中文特殊性的一个神经基础 (张学新, 2011)。单字形成双字的过程可能与部件形成单字的过程类似，N200 阶段可能也同时完成了对双字词的词形编码。在字形表征建立之前很难提取准确的语音和语义信息，所以中文字形的加工相对独立于语音、语义加工，N200 的性质相对单纯，波形清晰，与 N170 和 N400 界限分明。字形加工完成之后的 N400 反映随后的语音、语义激活。这样，N170，N200 和 N400 可能标识了中文词汇识别的三个主要阶段。

本文把 N200 成分理解为中文词汇呈现后约 200 ms 出现的负向波形，N200 增强效应则是 N200 成分在重复启动下的波幅增强。N200 是 P1 正波上的一个小偏转，分析比较困难。相比之下， N200 增强效应更清晰、稳定。Luck(2014)指出，相比于波峰或波谷，差异波更能反映特定的神经或认知过程。N200 增强效应是差异波，是更敏感的检测指标，可能更适合定义为一个成分。但以差异波为起点，也意味着只能通过重复启动范式开展研究，可能带来局限性。

根据外显记忆获取理论(Henson, 2003)，N200 增强效应可能并非反映字形加工过程，而更适合解释为外显记忆的检索机制，即当中文刺激再次出现时，被试会依据其首次出现的记忆，做“相同-不同”判断，导致额外加工。Maurer 等人(2024)认为 N200 增强效应并非独立成分，而是 N1 后期阶段在特定参考条件下的表现，是 N1 的重复抑制。把增强效应解释为一般性的认知加工过程是有价值的，但暂时还难以解释增强效应最突出的材料特异性问题，即为何只有汉字产生如此显著的重复增强效应。

新近研究虽然发现 N200 增强效应对朝鲜文词汇也存在，幅度很小(Yin & Zhang, 2021; Maurer et al., 2024)，但这些研究均以汉语母语者为被试。朝鲜文与汉字有局部相似性，汉语母语者在加工朝鲜文时，可能激活了相似的汉字字形信息。这些研究中的 N200 效应，应该只是中文 N200 效应在类似汉字的刺激类别上的泛化。真正构成对顶中区 N200 反映中文特有加工过程观点反驳的，是发现以字母文字为母语的被试识别字母文字时出现 N200 效应，特别是重复增强效应。从张学新 等人(2012)所做的文献回顾和其发表至今的文献中都始终没有看到这样的报告。以中文为母语的被试识别字母文字时也没有 N200 效应。比如，许贵芳(2008)使用同一范式，发现中文词出现幅度巨大的 N200 增强，但英文词在同一时段的波

形完全看不到重复启动的影响。总体分析表明，现有研究证据与顶中区 N200 反映中文特有的认知加工过程这一观点是一致的。

6 结论

与双字词一样，中文单字在刺激呈现后 200 ms 也诱发了清晰的顶中区 N200 反应，且该反应在重复启动时出现增强效应。N200 效应对双字词幅度更强，在单字中对真字比假字、非字更强，提示该成分反映了对汉字从部件到单字、从单字到双字的整合过程，可能是中文单字字形识别乃至中文字形识别的神经标志。

参考文献

Cao, X., Li, S., Zhao, J., & Weng, X. (2011). Left-lateralized early neurophysiological response for Chinese characters in young primary school children. *Neuroscience Letters, 492*(3), 165−169.

Chen, L., Fang, X., & Perfetti, C. A. (2017). Word-to-text integration: ERP evidence for semantic and orthographic effects in Chinese. *Journal of Neurolinguistics, 42*, 83−92.

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences.* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Du, Y., Hu, W., Fang, Z., & Zhang, J. X. (2013). Electrophysiological correlates of morphological processing in Chinese compound word recognition. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 601.

Du, Y., Zhang, Q., & Zhang, J. X. (2014). Does N200 reflect semantic processing? — An ERP study on Chinese visual word recognition. *PLoS ONE, 9*(3), e90794.

Gao, F., Wang, J., Wu, C., Wang, M. Y., Zhang, J., & Yuan, Z. (2022). The neural dynamics associated with lexicality effect in reading single Chinese words, pseudo-words and non-words. *Cognitive Neurodynamics*, 1−11.

Gu, J., Li, X., & Liversedge, S. P. (2015). Character order processing in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 41*(1), 127−137.

Henson, R. N. (2003). Neuroimaging studies of priming. *Progress in neurobiology, 70*(1), 53−81.

Hsu, C. H., Tsai, J. L., Lee, C. Y., & Tzeng, O. J. L. (2009). Orthographic combinability and phonological consistency effects in reading Chinese phonogra ms: an event-related potential study. *Brain and Language, 108*(1), 56−66.

Hua, H., Gu, J., Lin, N., Li, X. (2017). Letter/character position encoding in visual word recognition. *Advances in Psychological Science, 25*(7), 1132−1138.

[滑慧敏, 顾俊娟, 林楠, 李兴珊. (2017). 视觉词汇识别中的字符位置编码. *心理科学进展, 25*(7), 1132−1138.]

Hu, W., Lu, Y., Ren, C., & Zhang, J. X. (2013). ERP evidence for the time course of mental rotation in the mirror reading of Chinese words. *Neuroscience Letters, 552*, 151−155.

Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review Psychology, 62*, 621−647.

Lv, Y., Xu, G., Shen, D. (2008). Within- and between-language priming effects of Chinese and English：An ERP study. *Studies of Psychology and Behavior, 6*(2), 81−88.

[吕勇, 许贵芳, 沈德立. (2008). 汉英语言内及语言间重复启动效应的 ERP 研究. *心理与行为研究, 6*(2), 81−88.]

Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique.* MIT press.

Maurer, U., Brandeis, D., & McCandliss, B. D. (2005). Fast, visual specialization for reading in English revealed by the topography of the N170 ERP response. *Behavioral and brain functions*, *1*, 1-12.

Maurer, U., Zevin, J. D., & McCandliss, B. D. (2008). Left-lateralized N170 effects of visual expertise in reading: evidence from Japanese syllabic and logographic scripts. *Journal of Cognitive Neuroscience, 20*(10), 1878−1891.

Maurer, U., Rometsch, S., Song, B., Zhao, J., Zhao, P., & Li, S. (2024). Repetition suppression for familiar visual words through acceleration of early processing. *Brain Topography*, *37*(4), 608−620.

Meng, Y., Xiao, F., Zheng, S. (2023).The Attentional Boost Effect：Attention and Memory in Dual-Tasking (in Chinese). *Chinese Journal of Applied Psychology, 29*(6): 546−556.

[孟迎芳, 肖芬妮, 郑思琦. (2023). 注意促进效应:“一心两用” 下的注意和记忆. *应用心理学, 29*(6), 546−556.]

Meng, X., Jian, J., Shu, H., Tian, X., & Zhou, X. (2008). ERP correlates of the development of orthographical and phonological processing during Chinese sentence reading. *Brain Research, 1219*, 91−102.

Rossion, B., & Jacques, C. (2008). Does physical interstimulus variance account for early electrophysiological face sensitive responses in the human brain? Ten lessons on the N170. *Neuroimage, 39*(4), 1959−1979.

Rossion, B., Joyce, C. A., Cottrell, G. W., & Tarr, M. J. (2003). Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *Neuroimage, 20*(3), 1609−1624.

Schweinberger, S. R., Huddy, V., & Burton, A. M. (2004). N250r: a face-selective brain response to stimulus repetitions. *Neuroreport, 15*(9), 1501−1505.

Simon, G., Petit, L., Bernard, C., & Rebaï, M. (2007). N170 ERPs could represent a logographic processing strategy in visual word recognition. *Behavioral and Brain Functions, 3,* 1−11.

Tsai, P. S., Yu, B. H. Y., Lee, C. Y., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., & Wu, D. H. (2009). An event-related potential study of the concreteness effect between Chinese nouns and verbs. *Brain Research, 1253*, 149−160.

Xiandai Hanyu Pinlü Cidian. (1986). Beijing Language and Culture University Press.

[*现代汉语频率词典*. (1986). 北京语言学院出版社.]

Xie, J., Huang, Y., Chen, K., Lin, Q., Zhang, J. X., & Mo, L. (2021). ERP evidence for asymmetric orthographic transfer between traditional and simplified Chinese. *Experimental Brain Research, 239*, 365−379.

Xu, G. (2008). *Language Presentation and Language Switching Effects of Less Proficient Chinese-English Bilinguals: An ERPs Study*. (Master Thesis). Tianjin Normal University.

[许贵芳. (2008). *不熟练汉英双语者语言表征与切换的 ERP 研究*(硕士学位论文). 天津师范大学.]

Yang, H., Taikh, A., & Lupker, S. J. (2022). A reexamination of the impact of morphology on transposed character priming effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 48*(6), 785−797.

Yin, Y., & Zhang, Q. (2021). Chinese characters are read using not only visual but also writing motor information. *Psychophysiology, 58*(1), e13696.

Yin, Y., Cai, X., Ouyang, M., & Zhang, Q. (2020). The N200 enhancement effect in reading Chinese is modulated by actual writing. *Neuropsychologia, 142*, 107462.

Zhang, Q., Ding, J., Guo, C., Wang, Z. (2003). ERP difference between processing of nouns and verbs. *Acta Psychologica Sinica, 35*(06), 753−760.

[张钦,丁锦红,郭春彦,王争艳. (2003). 名词与动词加工的 ERP 差异. *心理学报, 35*(06), 753−760.]

Zhang, Q., Guo, C. Y., Ding, J. H., & Wang, Z. Y. (2006). Concreteness effects in the processing of Chinese words. *Brain and Language, 96*(1), 59−68.

Zhang, Q., Zhang, J. X., & Kong, L. (2009). An ERP study on the time course of phonological and semantic activation in Chinese word recognition. *International Journal of Psychophysiology, 73*(3), 235−245.

Zhang, J. X. (2011). The meaning spelling theory of Chinese characters: Insight into the nature of written Chinese from the perspective of cognitive psychology (in Chinese). *Journal of South China Normal University (Social Science Edition), 4*, 5−13.

[张学新. (2011). 汉字拼义理论: 心理学对汉字本质的新定性. *华南师范大学学报: 社会科学版, 4*, 5−13.]

Zhang, J. X., Fang, Z., Du, Y., Kong, L., Zhang, Q., & Xing, Q. (2012). Centro-parietal N200: an event-related potential component specific to Chinese visual word recognition. *Chinese Science Bulletin, 57*, 1516−1532.

[张学新, 方卓, 杜英春, 孔令跃, 张钦, 邢强. (2012). 顶中区 N200: 一个中文视觉词汇识别特有的脑电反应. *科学通报, 57*(5): 332−347.]

Zhou, A., Yin, Y., Zhang, J., & Zhang, R. (2016). Does font type influence the N200 enhancement effect in Chinese word recognition? Journal of Neurolinguistics, 39, 57−68.

The Centro-parietal N200: A Neural Marker for Orthographical Processing in Visual Chinese One-character Word Recognition

HU Wei [1], ZHANG Bao [2], JIA Xiaofei [3], CHEN Huixian [4], YUAN Jie [5], FANG Zhuo [6], ZHANG John Xuexin [7*]

[1]Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education, Academy of Psychology and Behavior, Faculty of Psychology, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; [2]Department of Psychology, Guangzhou University, Guangzhou, China, 510006; [3]Department of Psychology, Qufu Normal University, Qufu, China, 273165; [4]Institute for Higher Education, Shantou University, Shantou, China, 515041; [5]School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou, China, 510631; [6]School of Psychology, University of Ottawa, Ottawa, Canada, K1N6N5; [7]Department of Psychology, Fudan University, Shanghai, China, 200433

Abstract

* Authors to whom correspondence should be addressed. E-mail address: xuexinzhang@fudan.edu.cn.

Over the last ten years, research on event-related potential has consistently demonstrated that the detection of visual Chinese disyllabic words involves a centro-parietal N200 component linked to orthographical processing. It is uncertain, though, if this component is present for the identification of individual characters. This investigation examined whether Chinese one-character words activate the centro-parietal N200 similarly to two-character words to test whether this component only reflexs the relative position information of two-character words. If the answer is negative, it indicates that the N200 primarily encodes word-form information, such as the spatial positional relationship between characters. If the answer is positive, it suggests that the N200 at least partially reflects the processing of word level orthographic information.

With three experiments, the present paper explored the brain ERP response induced by one-character Chinese words. In Experiment 1, the ERP potentials induced by one-character and two-character Chinese words were compared under separate or mixed presentation conditions with a semantic judgement task, in which participants had to judge whether the presented stimulus was the name of an animal or a plant. In Experiment 2, a lexical decision task, in which participants had to judge whether the presented character was real or pseudo, was employed to determine if N200 is enhanced at the repetitive presentation condition for one-character Chinese words. Non-word character was also manipulated to further explore the nature of N200 effect in Experiment 3.

Results showed that Chinese one-character words also elicited a clear N200 ERP component just like two-character words do. Moreover, the N200 enhancement effect in the condition of repetition priming was also found, and effect for real words was significantly greater than that for pseudo- and non-word. This revealed that around 200 milliseconds after the presentation of a one-character Chinese word, N200 can already distinguish whether a specific positional relationship of radicals has a pre-exiting representation in the brain, i.e., whether it is a real character. This means that real words have already been differentiated from pseudo-word and non-word at this stage.

These findings suggest that the centro-parietal N200 component reflects the process of integrating visual features into single characters, acting as a neural marker for the orthographic processing of Chinese one-character words. This indicates that the N200 plays a crucial role in

identifying and distinguishing between real-, pseudo- and non-word, providing insight into how the brain integrates visual information during early stages of reading. Furthermore, this discovery offers a new perspective for understanding the temporal dynamics involved in Chinese lexical recognition and the underlying cognitive mechanisms involved in processing written language.

Keywords Centro-parietal N200, Chinese, one-character words, orthography, word recognition

附录1

实验1单字词、双字词样例（单字词由双字词拆解形成）

痛快	手续	经验	关键	发作	角色	软件	打听	打量	对象	处分	造化	正经	节目	企图	幽默
端详	功夫	奔放	指望	具体	底细	绝对	别扭	卫生	客气	扫兴	星期	抱负	洒脱	风流	封建
胡同	体会	条件	出色	刻薄	风光	天真	气派	手段	规模	体面	浪漫	勉强	地步	自由	漂亮
生意	和尚	挖苦	卖弄	流利	先生	基因	秘书	虚心	消遣	斯文	无赖	沉没	笑话	上升	疲劳
污蔑	海关	迅速	观看	乞求	提议	牢固	耳目	道理	主题	容纳	思念	歪曲	冤枉	平安	精巧
纯洁	末尾	优秀	能够	增加	迂腐	压抑	灭亡	倾斜	沙发	观念	等待	引导	合并	众多	安宁
封闭	观察	平坦	派遣	终止	湿润	宽广	道路	沉重	关闭	制造	合理	幽静	强壮	前景	丢掉

附录2

实验2单字词真字样例

夸	列	察	社	润	否	免	限	郎	账	奔	拥	宜	卓	建	明	物	周	往	爬
茶	始	叔	定	玫	阁	总	浑	屋	科	钩	洞	标	界	映	钥	庭	面	眨	故

实验2单字词假字样例

[illegible]

附录3

实验3单字词真字样例

欲	诺	鲍	宇	堡	限	郎	账	奔	拥	宜	导	多	众	浑	屋	科	钩	眨	故
终	合	静	强	题	宽	宁	壮	赖	安	精	亮	薄	弄	景	流	望	刻	封	基

实验3单字词非字样例

[illegible]

附录 4

N200 与 N170 成分对比(基于实验 3 脑电数据)

<u>真字条件</u>


N200电极C1
N200电极C2
N200电极CP1
N200电极CP2
N170电极P7
N170电极P8
N170电极PO3
N170电极PO4
真字: 红色-重复，蓝色-对照
uv ms
N200电极C1
N200电极C2
N200电极CP1
N200电极CP2
N170电极P7
N170电极P8
N170电极PO3
N170电极PO4
非字: 红色-重复，蓝色-对照
uv ms

非字条件

换-真条件


N200电极C1
N200电极C2
N200电极CP1
N200电极CP2
N170电极P7
N170电极P8
N170电极PO3
N170电极PO4
换-真: 红色-重复，蓝色-对照
uv ms
真-换条件
N200电极C1
N200电极C2
N200电极CP1
N200电极CP2
N170电极P7
N170电极P8
N170电极PO3
N170电极PO4
真-换: 红色-重复，蓝色-对照
uv ms